

10.31653/smf44.2022. 93-110

Мадей В.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВИКОРИСТАННЯ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ ДО СКЛАДУ ЯКИХ ВХОДИТЬ ПАЛИВО БІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Розвиток суспільства та технічного прогресу неможливий без виробництва та споживання енергії. Основним енергетичним джерелом є корисні копалини (вугілля, нафта та газ), природні запаси яких щорічно скорочуються [1-3]. Крім того, згоряння вуглеводневого палива супроводжується потраплянням в атмосферу та гідросферу небезпечних хімічних сполук та забруднюючих речовин [4-6]. Частина цих сполук є токсичними (насамперед оксиди азоту NO_x , оксиди сірки SO_x , монооксид вуглецю CO), частина сприяє зміні клімату (діоксид вуглецю CO_2 , вуглеводні C_mH_n , що не згоріли, «чорний» вуглець C). У зв'язку з цим останніми роками активно розвивається альтернативна енергетика (при цьому використовується геотермальна енергія, сонячна енергія, енергія вітру) та розробляються альтернативні палива (насамперед палива, отримані з рослинної сировини).

Одним із альтернативних видів палива є біодизельне паливо. На відміну від дизельного палива на нафтовій основі, біодизельне паливо виробляється з відновлюваних органічних джерел, його основні експлуатаційні характеристики (густина, в'язкість, температура спалаху, нижча теплотворна здатність) можна порівняти з аналогічними показниками дизельного палива – це дозволяє використовувати його в більшості сучасних дизельних двигунів [7-9]. При цьому наукові розробки, що підтверджують ефективність використання біодизельного палива для суднових дизелів, мають поодинокий характер; рекомендації щодо використання сумішей дизельного та біодизельного палива не мають системного підходу. Використання альтернативного палива (зокрема біопалива) в енергетичних установках морських суден регламентується рекомендаціями виробників палива. При цьому вказуються лише мінімальні та максимальні концентрації біопалива у паливній суміші, при яких забезпечується згоряння. Ефективність його використання безпосередньо залежить від компетентностей суднового екіпажу та наявності рекомендацій щодо технології застосування біопалива на різних експлуатаційних режимах роботи дизеля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними компонентами, що використовуються при виробництві біодизеля, є жири та олії, отримані з рослинних та тваринних жирів, хімічний склад яких незначно відрізняється [10-11]. В результаті етерифікації у присутності метанолу або етанолу, а також каталізатора (у вигляді NaOH, KOH, NaOCH₃ або KOCH₃) ці речовини реагують з утворенням моноалкілових ефірів, також відомих як біодизель. Далі біодизельна фаза додатково очищається за допомогою дистиляції та мембранного поділу [12-14]. Рослинні олії як моторні палива можна використовувати як у чистому вигляді, так і в суміші з дизельним та іншими нафтовими паливами, а також із газовими конденсатами, спиртами, ефірами та іншими альтернативними паливами. Джерелом рослинних олій служать олійні культури, в насінні або плодах яких містяться рослинні жири. До олійних відноситься більше 150 видів рослин, з яких виробляють рослинні олії. Залежно від кліматичних умов та доступності вирощування, сировиною для виробництва біодизелю можуть бути різні рослинні олії – від оливкової олії до тваринного жиру. Динаміка світового виробництва рослинних олій за останні п'ять років наведена у таблиці 1.

Таблиця 1/ Світове виробництво рослинних олій, 2016/17...2021/22 рр., млн. тонн

| | 2016/17 | 2017/18 | 2018/19 | 2019/20 | 2020/21 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Пальмове | 65,3 | 70,5 | 74,2 | 73,0 | 72,9 |
| Соеве | 53,8 | 55,2 | 56,0 | 58,5 | 59,4 |
| Ріпакове | 27,5 | 28,0 | 27,7 | 28,0 | 29,1 |
| Соняшникова | 18,3 | 18,6 | 19,6 | 21,2 | 19,1 |
| Пальмоядрове | 7,6 | 8,3 | 8,6 | 8,5 | 8,4 |
| Арахісове | 5,7 | 5,9 | 5,9 | 6,2 | 6,4 |
| Бавовняне | 4,4 | 5,1 | 5,0 | 5,2 | 4,8 |
| Кокосове | 3,3 | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 3,4 |
| Оливкове | 2,5 | 3,3 | 3,2 | 3,1 | 2,9 |
| Разом | 188,4 | 198,4 | 203,8 | 207,3 | 206,5 |

Близько 87,4 % світового виробництва рослинних олій припадає на пальмову, соєву, рапсову та соняшкову олії, решту 12,6 % – на арахісову, бавовняну, оливкову, кокосову та пальмоядрову. Безумовно, більша частина цього обсягу використовується у харчовій промисловості. Однак, частина олії використовується як сировина для виробництва біопалива. Ріпакова олія займає третє місце за обсягом виробництва у світі після пальмової та соєвої. У структурі світового

виробництва рослинних олій у сезоні 2020/21 р. на ріпакову олію припало близько 14,1 % ринку (29,1 млн. тонн). При цьому, для виробництва біодизельного палива, найактивніше використовується саме ріпакова олія [15]. У різних рослинних оліях міститься різна кількість жирних кислот, що призводить до певної відмінності в їх характеристиках. Деякі характеристики рослинних олій, які використовуються для виробництва біодизельного палива, наведено у таблиці 2.

Таблиця 2/ Характеристики рослинних олій

| | Олія канולי (канадський ріпак) | Кукуруд- зяна олія | Пальмо- ва олія | Ріпако- ва олія | Сосва олія | Відпра- цьована рослинна олія |
|---|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|---------------|--|
| Вміст сірки, ppm | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 5 |
| Кінематична в'язкість при 40°C, cSt | 4,38 | 4,19 | 4,61 | 4,50 | 4,26 | 4,80 |
| Температура спалаху, °C | 153 | 171 | 163 | 169 | 159 | 161 |
| Цетанове число | 61,5 | 60,9 | 50,5 | 54,7 | 52,3 | 48,5 |
| Густина, кг/м ³ | 883 | 883 | 873 | 879 | 882 | 879 |
| Нижча теплотвор- на здатність, кДж/кг | 38900 | 39900 | 37300 | 37600 | 37000 | 37600 |

Усі рослинні палива мають схожі один з одним основні характеристики – густина, температуру спалаху, нижчу теплотворну здатність. При згорянні вони виділяють приблизно на 10...12 % менше тепла, ніж дизельне паливо на нафтовій основі. Стандартів для теплоти згоряння палива з олії не існує, проте більш висока теплотворна здатність палива є важливою властивістю, що використовується під час визначенні їх якості [16-18].

Американське товариство з випробувань та матеріалів (American society of testing and materials – ASTM) як основну характеристику якості палива на основі рослинних олій визначає цетанове число. Специфікація ASTM D6751 вказує на мінімальне цетанове число 47 для рослинного палива. Усі палива на основі рослинних олій, приготовані з сировини, що найчастіше використовується, перевищують це значення.

Відмінною особливістю палив з олії є мінімальний рівень вмісту сірки. Це дозволяє використовувати їх у спеціальних екологічних

районах – зонах контролю емісії оксидів сірки (Sulphur emission control areas – SECAs) [19-21].

Екологічна ефективність використання біопалива також характеризується меншою кількістю вуглекислого газу, що утворюється за його згоряння. При спалюванні традиційне паливо виробляє велику кількість вуглекислого газу, який вважається парниковим газом та причиною утримання сонячного тепла на планеті. Спалювання вугілля та нафти підвищує температуру та викликає глобальне потепління. Використання біопалива зменшує вплив парникових газів на довілля [22-24].

У різних наукових дослідженнях містяться суперечливі дані щодо кількості викидів оксидів азоту NO_x при використанні біодизельного палива. Ця невідповідність пов'язана з варіативністю експерименту, типом нафтового палива, а також умовами проведення експерименту (концентрацією біопалива в паливній суміші з паливом нафтового походження, режимами роботи дизеля, особливостями та характеристиками його систем охолодження та випуску газів).

Постановка завдання. Як правило, експлуатація дизелів виключно на альтернативних паливах не виконується. Дані палива мають меншу в'язкість, а їх знижена теплотворна здатність не дозволяє отримати необхідну для переміщення поршня та обертання валу енергію. Тому в судновій енергетиці використовується суміш традиційного та альтернативного палива. Найбільш простий спосіб додавання альтернативного палива до традиційного – безпосередньо в судновій паливній системі перед подачею паливної суміші в циліндр дизеля. Концентрація альтернативного палива паливної суміші становить 5...30 % [25].

Найбільш доцільно використання паливних сумішей, що містять дизельне паливо та біопаливо, у суднових середньооборотних дизелях потужністю 400...700 кВт, які використовуються як допоміжні двигуни. У такому разі при загальному середньому навантаженні на судову електростанцію 250...550 кВт добова витрата подібних паливних сумішей становить 1200...2500 кг/добу. При 20...25% концентрації біопалива палива в паливній суміші його добова витрата не перевищує 500...650 кг/добу. При автономності плавання 25...30 діб, подібні обсяги можуть бути поставлені в багатьох морських портах і зберігатися на борту судна [26, 27]. Також необхідно зазначити, що допоміжні двигуни встановлюються на всіх судах у кількості 2...4 і мають кожен свою паливну систему. Це дозволяє

варіювати використання біопалива, а також полегшує завдання визначення оптимальної концентрації біопалива в паливній суміші.

Завданням дослідження було визначення впливу палива біологічного походження на економічні та екологічні показники суднового дизеля та визначення за цими показниками оптимальної концентрації біодизельного палива на різних експлуатаційних режимах роботи суднового дизеля.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на спеціалізованому судні дедвейтом 10820 тонн, що здійснювало короточасні (протягом 4...6 днів) переходи між портами, в яких була передбачена можливість поповнення запасів альтернативного палива. Як таке використовувалось біопаливо B99.9 FAME, що складається з 99,9 % біодизельного палива та 0,1 % дизельного палива класу Ultra-Low Sulfur Diesel fuel (з наднизьким вмістом сірки $S=0,03\%$). Як «базове» використовувалось паливо DMB, що рекомендовано для середньообертових дизелів, які виконують функції допоміжних двигунів. Вміст біопалива в паливній суміші змінювався в межах 5...20 % від загального об'єму.

Дослідження виконувались на судових середньо-обертових дизелях 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel з наступними основними характеристиками:

діаметр циліндра – $d=0,17$ м;

хід поршня – $s=0,27$ м;

частота обертання – $n=1000$ хв⁻¹;

номінальна потужність – $N_{\text{ном}}=490$ кВт;

кількість циліндрів – $i_{\text{ц}}=5$,

що у кількості трьох штук входили до складу судової допоміжної енергетичної установки. Принципова схема паливної системи дизелів показана на рис. 1.

Паливна цистерна одного з дизелів не змінювалась та цей дизель експлуатувався на паливі DMB (з в'язкістю 8 сСт і вмістом сірки 0,08 %) та вважався «контрольним». До паливних систем двох інших дизелів додатково встановлювалось обладнання, що дозволяло використовувати в них біопаливо [28].

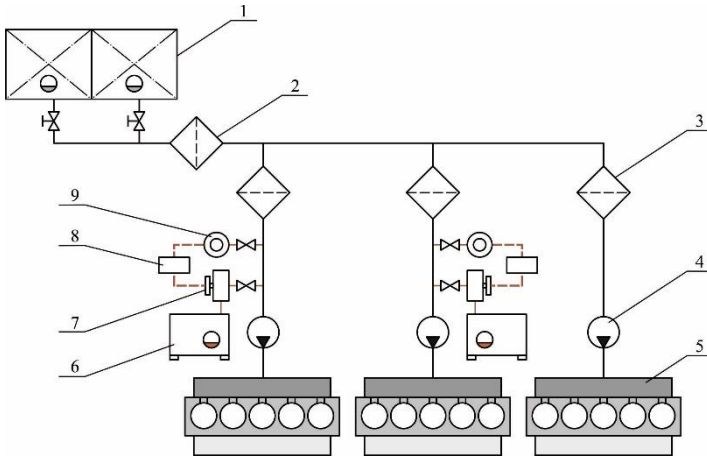


Рис. 1. Принципова схема паливної системи суднових дизелів 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel:

- 1 – витратна паливна цистерна; 2 – паливний фільтр грубого очищення; 3 – паливний фільтр тонкого очищення; 4 – паливний насос; 5 – дизель; 6 – цистерна біопалива; 7 – дозатор; 8 – мікроконтролер; 9 – витратомір

З витратної цистерни 1 паливо ДМВ через фільтр грубого очищення 2 прямувало до паливних насосів 4 дизелів 5. Додатково очищення палива забезпечувалось за допомогою фільтра 3. Контур подачі палива до першого дизеля не змінювався та дизель експлуатувався на паливі ДМВ. В'язкість палива дозволяє додавати в нього біопаливо (з в'язкістю 10 сСт). Вміст біопалива в паливній суміші змінювався в інтервалі 5 ... 20 %, паливна суміш подавалася до двох інших дизелів, в контур яких додатково встановлювалися цистерна біопалива 6, дозатор 7 і витратомір 9. Необхідна кількість біопалива в паливній суміші забезпечувалась за допомогою мікроконтролера 8, використання яких день від дня поширюється в суднових енергетичних установках [29, 30].

Критерієм економічності роботи дизеля була обрана питома ефективна витрата палива b_e [31]. Як екологічні показники роботи суднових дизелів приймалися концентрація оксидів азоту C_{NO_x} та об'ємний вміст оксиду вуглецю C_{CO_2} в випускних газах [32, 33].

Питома ефективна витрата палива b_e визначалась за допомогою суднових вимірювальних засобів. – витратоміра, встановленого на

магістралі підведення палива до паливного насосу високого тиску, а також таймера, та розраховувалася за залежністю

$$b_e = \frac{G_r}{N_{\text{ерсж}}^{\Delta}},$$

де G_r – годинна витрата палива, кг/год, що визначається за виразом

$$G_r = \frac{V_r \rho}{t},$$

V_r – обсяг палива, що пройшло через витратомір, м³;

ρ – густина палива при відповідній температурі, кг/м³;

t – час, протягом якого проводився експеримент на відповідному режимі роботи дизеля, год;

$N_{\text{ерсж}}^{\Delta}$ – потужність дизеля, на різних режимах роботи, кВт, яка визначалась за допомогою електронного обладнання, розташованого в центральному посту управління машинного відділення.

Під час проведення експериментів концентрація оксидів азоту NO_x, а також об'ємний вміст CO₂ в випускних газах контролювались за допомогою газоаналізатора Testo350XL (виробництва Німеччини), що дозволяє визначати концентрації наступних речовин: CO₂, O₂, N₂, NO_x, CH₄, HC, SO₂, H₂S, а також температуру, вологість, швидкість і диференціальний тиск вимірюваного середовища [34].

Для перерахунку виміряної за допомогою газоаналізатора Testo350XL концентрації NO_x, [ppm], (що визначалась в ppm або в млн⁻¹) в таку, що відповідно до вимог Annex VI MARPOL визначається в г/(кВт·год), за допомогою витратоміру вимірювалась витрата випускних газів, $G_{\text{вг}}$, кг/год, та далі виконувався розрахунок концентрації NO_x, [кг/год]:

$$\text{NO}_x [\text{кг/год}] = \frac{\text{NO}_x [\text{ppm}] \cdot G_{\text{вг}}}{\text{limNO}_x},$$

де limNO_x – максимально можливе значення концентрації NO_x, що визначається за газоаналізатором Testo350XL (2000⁻¹ або 3000 млн⁻¹ в залежності від обраного діапазону вимірювань).

Після чого, з урахуванням значення ефективної потужності дизеля $N_{\text{ерсж}}^{\Delta}$, необхідна в розмірності кг/(кВт·год) концентрація NO_x визначалась як:

$$\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x [\text{кг/год}]}{N_{\text{ерсж}}^{\text{д}}}$$

Витрата випускних газів вимірювалась за допомогою витратоміра MT100S фірми «Siemens AG» (Німеччина). Витратоміри серії MT100 відносяться до багатоточкових (із кількістю вимірювальних зондів від 2 до 8) масових витратомірів повітря і газів, які працюють за принципом теплового розсіювання. Чутливість витратомірів MT100 становить 0,07.. 0,2 м³/с, робоча температура – до 450° С, що забезпечує їх функціональність у всьому діапазоні експлуатаційних навантажень дизеля. Витратоміри MT100 та газоаналізатори Testo350XL відповідають вимогам Системи безперервного моніторингу викидів (Continuous Emission Monitoring System – CEMS) Агентства з охорони навколишнього середовища (Environmental Protection Agency – EPA).

Аналіз випускних газів виконувався в газовипускній магістралі на відстані 10 м від місця виходу газів з газотурбонагнетача, що відповідало вимогам Технічного кодексу за NO_x.

Похибка у вимірюванні витрати газів, що визначався витратоміром MT100S, не перевищувала ±0,5 %; похибка у вимірі емісії NO_x у випускних газах, що виконувалась газоаналізатором Testo350XL становила ±1,0 %; похибка у визначенні питомої ефективної витрати палива не перевищувала ±2,5 %.

Під час проведення дослідження для забезпечення споживачів енергією експлуатувався «контрольний» дизель (що використовував паливо DMB) та один, або два інших (в яких використовувалась суміш палива DMB та біопалива). Дизелі, на яких виконувалися експериментальні дослідження, забезпечували потужністю постійні групи споживачів. Дослідження виконувалися в діапазоні навантажень на дизель (0,3...0,8)N_{енм}.

Перед початком проведення експерименту всі дизелі мали порівняний моторесурс паливної апаратури, деталей циліндрової групи, підшипників руху, а також однаковий технічний стан. У випадку зміні кількості споживачів енергії та їх потужності необхідне навантаження перерозподілялося на дизелі, що не задіяні в експерименті, при цьому дизель, на якому проводилися дослідження, експлуатувався на постійному навантаженні. Крім того, під час проведення експерименту на дизелі підтримувалися постійні температурні режими в системах змащування та охолодження. Під час проведення експерименту дизель протягом 1,0...1,5 годин працював на постійному нава-

нтаженні протягом яких виконувалось вимірювання основних параметрів і усереднення отриманих значень. Це забезпечувало коректність проведення досліджень і можливість зіставлення вимірів, виконаних на різних дизелях. У зв'язку з великим часом проведення експерименту інерційність вимірювання витрати газів (характерний недолік витратомірів теплових витратомірів, до класу яких відноситься витратомір МТ100S) повністю нівелювалася і не впливала на результати. За таких умов також постійною можливо вважати концентрації CO_2 та NO_x в випускних газах. Похибка в навантаженні під час переходу дизеля з одного сталого режиму до іншого не перевищувала $\pm 1,5\%$ [35].

Результати дослідження наведені в табл. 3-5.

Таблиця 3/ Питома ефективна витрата палива, г/(кВт·год), для паливної суміші різного складу

| Режим роботи дизеля | DMB | DMB+5 % біопалива | DMB+10 % біопалива | DMB+15 % біопалива | DMB+20 % біопалива |
|-----------------------|-----|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $0,3N_{\text{енорм}}$ | 211 | 218 | 223 | 227 | 229 |
| $0,4N_{\text{енорм}}$ | 207 | 213 | 216 | 220 | 221 |
| $0,5N_{\text{енорм}}$ | 202 | 207 | 210 | 213 | 214 |
| $0,6N_{\text{енорм}}$ | 198 | 202 | 203 | 204 | 206 |
| $0,7N_{\text{енорм}}$ | 194 | 196 | 197 | 198 | 199 |
| $0,8N_{\text{енорм}}$ | 195 | 198 | 199 | 200 | 201 |

Таблиця 4/ Концентрація оксидів азоту у випускних газах, г/(кВт·год), для паливної суміші різного складу

| Режим роботи дизеля | DMB | DMB+5 % біопалива | DMB+10 % біопалива | DMB+15 % біопалива | DMB+20 % біопалива |
|-----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $0,3N_{\text{енорм}}$ | 7,78 | 7,48 | 6,72 | 6,21 | 6,83 |
| $0,4N_{\text{енорм}}$ | 8,03 | 7,52 | 6,86 | 6,28 | 6,93 |
| $0,5N_{\text{енорм}}$ | 8,21 | 7,63 | 6,96 | 6,32 | 7,07 |
| $0,6N_{\text{енорм}}$ | 8,36 | 7,74 | 7,05 | 6,38 | 7,17 |
| $0,7N_{\text{енорм}}$ | 8,48 | 7,82 | 7,11 | 6,42 | 7,25 |
| $0,8N_{\text{енорм}}$ | 8,58 | 7,88 | 7,17 | 6,47 | 7,31 |

За результатами експериментів побудовані діаграми, що відображають зміни питомої ефективної витрати палива (рис. 2, а), емісії NO_x (рис. 2, б) та об'ємної концентрації CO_2 в випускних газах (рис. 2, в) для різних умов експлуатації суднового дизеля 5DC-17A Tier II Daihatsu Diesel.

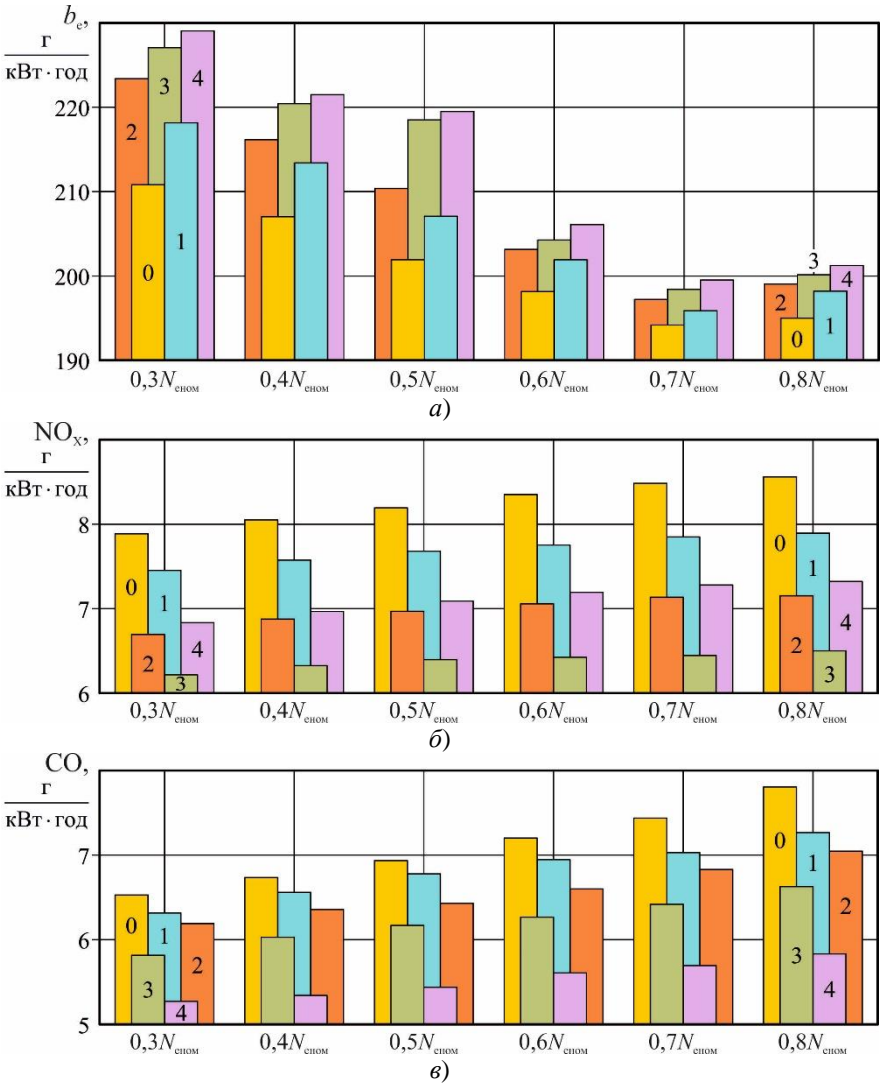


Рис. 2. Залежності показників роботи дизеля 5DC-17A від навантаження під час використання палива різного складу: 0 – DMB; 1 – DMB+5 % біопалива; 2 – DMB+10 % біопалива; 3 – DMB+15 % біопалива; 4 – DMB+20 % біопалива; а – питома витрата палива; б – емісія оксидів азоту; в – об’ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах

Таблиця 5. Об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах, %, для паливної суміші різного складу

| Режим роботи дизеля | DMB | DMB+5 % біопалива | DMB+10 % біопалива | DMB+15 % біопалива | DMB+20 % біопалива |
|-----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,3N _{енорм} | 6,05 | 5,86 | 5,72 | 5,36 | 4,78 |
| 0,4N _{енорм} | 6,25 | 6,05 | 5,86 | 5,52 | 4,83 |
| 0,5N _{енорм} | 6,48 | 6,27 | 5,93 | 5,69 | 4,97 |
| 0,6N _{енорм} | 6,69 | 6,45 | 6,12 | 5,79 | 5,12 |
| 0,7N _{енорм} | 6,92 | 6,51 | 6,31 | 5,93 | 5,22 |
| 0,8N _{енорм} | 7,29 | 6,75 | 6,52 | 6,12 | 5,36 |

Відносні зміни концентрації оксидів азоту ΔNO_x та об'ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO_2 в випускних газах, а також питомої ефективної витрати палива Δb_e розраховувались за виразами

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^{DMB} - NO_x^{bio}}{NO_x^{DMB}} \cdot 100\%, \quad \Delta CO_2 = \frac{CO_2^{DMB} - CO_2^{bio}}{CO_2^{DMB}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{bio} - b_e^{DMB}}{b_e^{bio}} \cdot 100\%,$$

де NO_x^{DMB} , NO_x^{bio} , b_e^{DMB} , b_e^{bio} – концентрація оксиду азоту в випускних газах та питома ефективна витрата палива під час експлуатації дизеля на паливі DMB та біопаливі, г/(кВт·год);

CO_2^{DMB} , CO_2^{bio} – об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах під час експлуатації дизеля на паливі DMB та біопаливі, %.

Отримані значення узагальнені у табл. 6 - 8, а також відображені на діаграмах, наведених на рис. 3.

Таблиця 6

Відносне збільшення питомої ефективної витрати палива, %, для паливної суміші різного складу

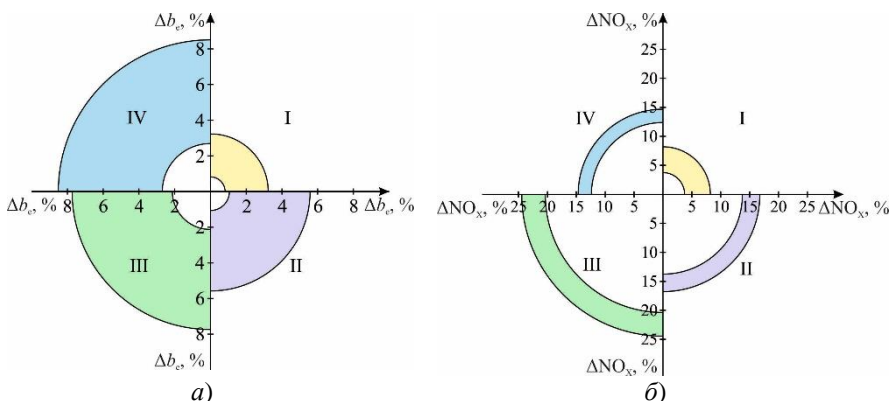
| Режим роботи дизеля | DMB+5 % біопалива | DMB+10 % біопалива | DMB+15 % біопалива | DMB+20 % біопалива |
|-----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,3N _{енорм} | 3,32 | 5,69 | 7,58 | 8,53 |
| 0,4N _{енорм} | 2,9 | 4,35 | 6,28 | 6,76 |
| 0,5N _{енорм} | 2,48 | 3,96 | 5,45 | 5,94 |
| 0,6N _{енорм} | 2,02 | 2,53 | 3,03 | 4,04 |
| 0,7N _{енорм} | 1,03 | 1,55 | 2,06 | 2,58 |
| 0,8N _{енорм} | 1,54 | 2,05 | 2,56 | 3,08 |

Таблиця 7. Відносне зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах, %, для паливної суміші різного складу

| Режим роботи дизеля | DMB+5 % біопалива | DMB+10 % біопалива | DMB+15 % біопалива | DMB+20 % біопалива |
|-----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,3N _{енорм} | 3,86 | 13,62 | 20,18 | 12,21 |
| 0,4N _{енорм} | 6,35 | 14,57 | 21,79 | 13,7 |
| 0,5N _{енорм} | 7,06 | 15,23 | 23,02 | 13,89 |
| 0,6N _{енорм} | 7,42 | 15,67 | 23,68 | 14,23 |
| 0,7N _{енорм} | 7,78 | 16,16 | 24,29 | 14,5 |
| 0,8N _{енорм} | 8,16 | 16,43 | 24,59 | 14,8 |

Таблиця 8. Відносне зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах, %, для паливної суміші різного складу

| Режим роботи дизеля | DMB+5 % біопалива | DMB+10 % біопалива | DMB+15 % біопалива | DMB+20 % біопалива |
|-----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,3N _{енорм} | 3,14 | 5,46 | 11,4 | 20,99 |
| 0,4N _{енорм} | 3,20 | 6,24 | 11,68 | 22,72 |
| 0,5N _{енорм} | 3,24 | 8,49 | 12,19 | 23,30 |
| 0,6N _{енорм} | 3,59 | 8,52 | 13,45 | 23,47 |
| 0,7N _{енорм} | 5,92 | 8,82 | 14,31 | 24,57 |
| 0,8N _{енорм} | 7,41 | 10,56 | 16,05 | 26,47 |



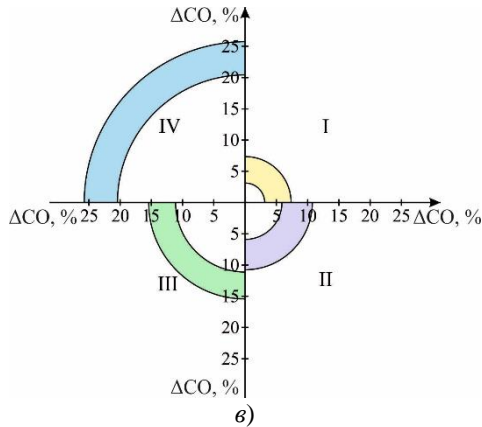


Рис. 3. Діапазон відносної зміни показників роботи дизеля 5DC-17A від навантаження під час використання паливної суміші різного складу: 1 – DMB+5 % біопалива; 2 – DMB+10 % біопалива; 3 – DMB+15 % біопалива; 4 – DMB+20 % біопалива;

a – збільшення питомої витрати палива; *б* – зменшення емісії оксидів азоту; *в* – зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. В суднових дизелях середньої потужності, що використовуються як допоміжні, можливо використовувати паливні суміші, до складу яких входять паливо нафтового походження (як основна частина, масова доля якої складає 80...95 %) та паливо біологічного походження (з масовою долею 5...20 %). Підготовку подібних паливних сумішей доцільно виконувати в суднової паливної системі безпосередньо перед їх подачею до циліндрів дизеля.

2. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження сприяє поліпшенню екологічних показників їх роботи. Дослідженнями встановлено, що для 5...20 % концентрації палива біологічного походження в складі паливної суміші і діапазоні експлуатаційних навантажень на судновий дизель 5DC-17A 30...80 % номінальної потужності спостерігається зменшення концентрації оксидів азоту у випускних газах на 3,86...24,59 % та зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах на 3,14...26,47 %. Зменшення об'ємного вмісту оксиду вуглецю в випускних газах здійснюється пропорційно підвищенню вмісту біопалива в складі паливної суміші на всіх експлуатаційних режимах дизеля. Зменшення емісії оксидів азоту найбільш ефективно

здійснюється під час 10...15 % концентрації біопалива в складі паливної суміші з паливом нафтового походження. Саме цю концентрацію (для будь яких навантажень дизеля 5DC-17A) пропонується вважати найбільш оптимальною з точки зору забезпечення екологічних показників роботи дизеля.

3. Використання паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження призводить до підвищення питомої витрати палива, що зменшує економічність роботи дизеля. З підвищенням вмісту біопалива в паливній суміші з 5 до 20 % питома ефективна витрата палива зростає на 1,54...8,53 %. При цьому найбільше зростання – 3,32...8,53 % відповідає навантаженню 30 %, найменше – 1,54...3,08 % навантаженню 80 % за умовою 20 % вмісту біопалива в складі паливної суміші. Під час навантаження 40...50 % збільшення питомої витрати палива досягає 6,76 та 5,94 % відповідно. У зв'язку з цим, під час навантаження дизеля в діапазоні 30...40 % доцільно використання паливних сумішей з вмістом біопалива 5...10 %. Перевищення цей концентрації суттєво знижує економічність роботи дизеля.

Подальші дослідження доцільно спрямовувати на визначення впливу біопалива на якість процесу згорання паливної суміші та на термодинамічні показники процесу згорання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 10 - 14. DOI : 10.31653/smf341.2020.10-14.

2. Сагін С.В., Солодовников В.Г. Применение ультразвуковой обработки топлива для снижения сернистого износа двигателя // Технические науки – от теории к практике. Сб. ст. по материалам XXXV междунар. науч.-практ. конф. № 6 (31). – Новосибирск : «СибАК», 2014. – С.42-48.

3. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012 . – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84 - 103.

4. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // Naše more: International Journal of Maritime Science & Tech-

nology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1 - 9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.

5. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // *Naše more : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78 - 86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.

6. Sagin S.V., Kuropyatnik A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // *American Scientific Journal*. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 - 71.

7. Sagin S., Madey V., Sagin A. Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. Vol. 10. – Iss. 10. – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

8. Madey V. V. Usage of biodiesel in marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 18-21. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-18-21>.

9. Мацкевич Д.В., Заблоцкий Ю.В. Определение смазочной способности дизельных топлив // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 2011. – № 28. – Одесса: ОНМА. – С.145 - 153.

10. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

11. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991

12. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018*. – № 7-8 (July-August). – P. 55 - 59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.

13. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // *Судовые энергетические установки: науч.-техн.сб.* – 2011. – № 26. – Одесса: ОНМА. – С.116-125.

14. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 20 - 25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

15. Марков В.А., Нагорнов С.А., Романцова С.В., Неверова В.В., Са Бовэнь. Метилловый эфир рапсового масла как дизельное топливо // Транспорт на альтернативном топливе. – 2017. – № 6(60). – С. 17 - 30.

16. Мацкевич Д.В., Сагин С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб, 2010. – Вып. 25. – Одесса : ОНМА. – С.109 - 118.

17. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. Зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 -100.

18. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67 - 71.

19. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 79 - 89.

20. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 132 - 142.

21. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5 - 9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

22. Sagin S., Madey V., Stoliaryk T. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. № 5 (2(61)). –P. 26 - 32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.

23. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн.

зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108 - 119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

24. Ратайчук О.В., Сагін С.В. Підвищення ефективності процесу наддува суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 15-19. DOI : 10.31653/smf341.2020.15-19.

25. Мадей В. В. Використання альтернативного палива в суднових середньообертових дизелях // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 45 - 53. doi: 10.31653/smf343.2021.41-53.

26. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники : науч.-виробн. журнал, 2011. – № 3. – Одесса : ОНМУ. – С. 78 - 88.

27. Сагін С.В. Оптимизация расхода высокощелочного цилиндрического масла судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. – 2016. – № 7 (28) . URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3385>.

28. Куропятник А.А., Сагін С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72 - 80.

29. Сагін С.В., Кривий М.О. Розрахунок контактної тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 84 - 92. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-84-92.

30. Kuropyatnyk O.A. The use of bypass exhaust gases to ensure the environmental performance of marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 217 - 228.

31. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

32. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

33. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drill-

ships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 9. – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

34. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V., Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters / S.V. Sagin, // *Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

35. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. / V. Madey // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2022. Vol. 2(1(64)). – P. 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.